



装备科技译著出版基金



高新科技译丛

Signal Processing in Radar Systems

# 复杂雷达系统中数字信号 处理设计与实现

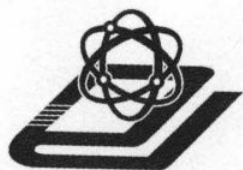
[ 乌克兰 ] Vyacheslav Tuzlukov 著 申绪润 李金梁 等译



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



CRC Press  
Taylor & Francis Group



装备科技译著出版基金

# 复杂雷达系统中数字信号 处理设计与实现

[乌克兰] Vyacheslav Tuzlukov 著

申绪润 李金梁 张晓芬 译  
周 波 王建路 郝晓军

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-172 号

图书在版编目(CIP)数据

复杂雷达系统中数字信号处理设计与实现/(乌克兰)  
维亚切斯拉夫·图兹卢科夫(Vyacheslav Tuzlukov)著;  
申绪润等译. —北京:国防工业出版社,  
2019.9

书名原文:Signal Processing in Radar Systems  
ISBN 978-7-118-11606-9

I. ①复… II. ①维… ②申… III. ①雷达系统-  
数字信号处理-研究 IV. ①TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第297009号

Signal Processing in Radar Systems by Vyacheslav Tuzlukov  
978-1-4398-2607-2

Copyright© 2013 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

National Defense Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版经授权由国防工业出版社独家出版, 并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

※

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)  
三河市腾飞印务有限公司印刷  
新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 36¼ 字数 700 千字  
2019年8月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 256.00元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777  
发行传真: (010)88540755

发行邮购: (010)88540776  
发行业务: (010)88540717

## 译者序

本书由信号处理领域的知名专家 Vyacheslav Tuzlukov 教授撰写而成。在此之前,作者还曾出版过几部专著,包括 *Signal Processing in Noise: A New Methodology* (1998 年)、*Signal Detection Theory* (2001 年)、*Signal Processing Noise* (2002 年) 等。在一系列著作和论文中,作者提出了噪声中信号处理的广义方法。由于利用了似然函数均值和方差的联合概率分布,相比只利用似然函数均值概率分布的经典信号处理方法和现代信号处理方法来说,这种方法可以带来信号检测和参数估计性能的改善,是信号处理研究领域的重要突破。本书正是基于信号处理的广义方法对雷达系统的信号检测和参数估计等方法进行了论述,是该领域的最新研究成果之一。

随着微电子技术的发展,雷达系统的数字化和自动化程度越来越高,结构与组成也变得越来越复杂,本书正是针对雷达系统的这种发展趋势,介绍其系统设计问题。跟以往同类著作相比,本书从系统方法论的角度考虑雷达系统设计问题,因此站位较高。针对复杂雷达系统的设计问题,本书对算法设计、算法实现、信号检测和参数估计等方面进行了深入、详细的论述,相关内容对我国雷达装备技术的发展、雷达系统的研制和设计具有重要的参考和借鉴作用,因此有着极高的翻译价值。本书适合雷达及相关电子工程专业的本科高年级学生、研究生以及从事雷达系统研制、设计的工程人员使用。

本书由申绪润、李金梁、张晓芬、周波、王建路和郝晓军等共同完成翻译,申绪润、李金梁、张晓芬完成了全书的统稿和审校工作。翻译过程中,得到了国防工业出版社的帮助、支持和鼓励,在此表示衷心的感谢!

由于原书作者为非英语国家人士,且工作在非英语国家,因此原书中部分术语跟国内通用的不太一致,而且部分文字的语法也不够严谨,给原文内容的正确理解和准确把握造成了一定的困扰。在翻译过程中,译者虽曾向原作者进行了咨询和请教,但难免挂一漏万,且由于译者经验和水平有限,译稿中错误和疏漏之处在所难免,不尽人意之处敬请读者不吝赐教!

译者

2018 年 12 月

# 前 言

雷达系统的基本任务是针对稳健信号处理和信号参数估计等问题给出适当的解决方案,虽然前人对噪声环境中雷达系统信号处理方法已进行了广泛研究,并出版了大量专著和期刊论文,但目前仍有很多关键问题尚未解决。针对这些问题,出现了一些新的解决方法,如噪声中雷达系统的稳健信号处理方法,这种方法是对原有研究成果的继承和深化,可以获得更佳的性能。

本书从噪声中信号处理的广义方法出发,重点论述了复杂雷达系统中的稳健信号处理问题。噪声中信号处理的广义方法的提出是基于一个貌似有些抽象的概念,即引入一个不包含任何信号信息的额外噪声源,并用其提高复杂雷达系统的性能。理论研究和实验分析都表明,噪声中信号处理的广义方法进行判决利用的是似然函数的均值与方差的联合充分统计量,而经典信号处理方法和现代信号处理方法仅利用了似然函数均值的充分统计量。

跟经典理论和现代理论中的最佳信号处理算法相比,由于利用了似然函数统计特性的额外信息,复杂雷达系统稳健信号处理算法的性能更好,这种信号处理的广义方法使得超越经典和现代信号处理理论给出的潜在抗噪极限成为可能。在复杂雷达系统中,用基于噪声中信号处理的广义方法替代基于经典和现代信号处理理论中的最佳和准最佳信号处理算法可获得更好的检测性能。

为了更好地理解广义方法的基本概念和基本原理,读者可以参考作者之前撰写的几本著作: *Signal Processing in Noise: A New Methodology* (IEC, Minsk, 1998), *Signal Detection Theory* (Springer-Verlag, New York, 2001), *Signal Processing Noise* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2002) 以及 *Signal and Image Processing in Navigational Systems* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2005)。

雷达系统是电子工程领域的重要内容。大学期间的课程设置一般将重点放在工程师所使用的基本工具上,如电路设计、信号分析、固态器件、数字化处理、电子器件、电磁学、自动控制 and 微波理论等。但在电子工程实践中,在构建特定用途的某型系统时,这些只是所需的技术、零部件或子系统而已。

雷达系统的设计涉及很多方面,其中最重要的是概念设计。研制新型雷达系统之前,在考虑到用户友好性的同时,必须开展概念设计以指导研发。概念设计包括根据雷达方程及相关方程确定雷达系统的特性,并明确可能采用的发

射机、天线、接收机和信号处理机等子系统的一般特性。此外,为了应用现代稳健信号处理算法,还要给定所采用的计算机子系统的结构。只有遵从系统方法学的指导,才有可能完成概念设计。

需要说明的是,至少有两种研发新型复杂雷达系统的方式。一种是采用新发明、新技术、新器件或新知识,第二次世界大战早期微波磁控管的发明就是典型例证,磁控管的出现曾给雷达系统的设计带来了变革。另一种(可能也是更常用的)雷达系统概念设计方式,就是首先确定新型雷达系统必须具备的功能,然后对现有各种可以实现所需功能的方法进行认真分析和评估,选择其中最能满足功能需求和成本约束的一种方法。本书对雷达系统设计的上述两种系统学方法都进行了详细论述。

采用稳健的信号处理算法并准确给出信号参数是复杂雷达系统设计的重要目标之一。为此在设计复杂雷达系统时,需要采用随机过程实验分析所获得的理论和方法,如可基于统计估计理论设计和构建随机过程统计参数的最佳或准最佳测量器,同时还要特别关注统计参数估计时的系统误差和随机误差,它们都是观测时间和噪声水平的函数。

随机过程的主要统计参数包括均值(即数学期望)、方差、相关函数(或协方差)、功率谱密度、概率密度函数和尖峰信号参数等,书中详细给出了这些统计参数的各种测量和估计方法,这些方法均可采用模拟或数字的方式实现,书中对这两种方式的测量值与测量误差(代表了这些方法的性能)进行了研究。另外还给出了数学期望、方差和相关函数等参数的数字式测量器结构框图以及最佳测量器结构框图,并对上述参数估计的方差和偏差进行了分析。针对非平稳随机过程,给出了数学期望和方差的估计方法,并给出了统计参数估计的偏差和方差的通用表达式,以便直接进行解析计算。

在此,要向工作在雷达系统稳健信号处理领域的同事们致以谢意,与他们的交流讨论使我获益匪浅,要特别感谢 V. Ignatov 教授、A. Kolyada 教授、I. Malevich 教授、G. Manshin 教授、D. Johnson 教授、B. Bogner 教授、Yu. Sedyshev 教授、J. Schroeder 教授、Yu. Shinakov 教授、A. Kara 教授、Kyung Tae Kim 教授、Yong Deak Kim 教授、Yong Ki Cho 教授、V. Kuzkin 教授、W. Uemura 教授以及 O. Drummond 博士等。

还要对韩国大邱市庆北国立大学 IT 工程学院电子工程学校信息技术与通信系的各位同事表示感谢,他们提出了宝贵的意见和建议,并为本书的完成提供了很多帮助。本书的出版得到了庆北国立大学 2010 年科研基金的资助。

本书能够出版,还要归功于 Konopka, Kari Budyk, Richard Tressider, Suganthi Thirunavukarasu, John Gandour 以及 Taylor & Francis 集团 CRC 出版社的全体职

员,感谢他们的支持与鼓励。

最后要特别感谢我的家人:我亲爱的妻子 Elena,我的孩子 Anton 和 Dima 以及我挚爱的母亲 Natali。在书稿写作过程中,他们给予了我很多支持。没有他们的帮助,本书不可能面世。

最终,对我的父亲和导师 Peter Tuzlukov 博士致以最诚挚的感激,是他引领我进入科学的殿堂。

Vyacheslav Tuzlukov

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一部分 雷达数字信号处理与控制算法设计</b>	
<b>第 1 章 复杂雷达系统设计的系统方法学原理 .....</b>	<b>9</b>
1.1 系统方法学 .....	9
1.2 复杂雷达系统的主要技术要求 .....	12
1.3 自动化复杂雷达系统的系统设计 .....	18
1.4 雷达信号处理系统设计 .....	21
1.5 总结与讨论 .....	26
<b>第 2 章 基于数字式广义检测器的信号处理 .....</b>	<b>30</b>
2.1 模数转换的基本原理 .....	30
2.1.1 采样过程 .....	30
2.1.2 量化与信号采样的转换 .....	34
2.1.3 模数转换的设计原理与主要参数 .....	35
2.2 针对相参脉冲信号的数字式广义检测器 .....	37
2.2.1 匹配滤波器 .....	37
2.2.2 广义检测器 .....	39
2.2.3 数字式广义检测器 .....	41
2.3 时域卷积 .....	44
2.4 频域卷积 .....	52
2.5 DGD 设计实例 .....	57
2.6 总结与讨论 .....	59
<b>第 3 章 跨周期数字信号处理算法 .....</b>	<b>63</b>
3.1 数字式动目标指示算法 .....	63
3.1.1 构建原则与性能指标 .....	63

3.1.2	数字式带阻滤波器 .....	65
3.1.3	雷达系统重频变化时的数字式动目标指示器 .....	71
3.1.4	数字式动目标指示器中的自适应技术 .....	72
3.2	参数已知时相参脉冲信号的 DGD .....	74
3.2.1	初始条件 .....	74
3.2.2	目标回波脉冲串的 DGD .....	77
3.2.3	目标回波脉冲串二元量化后的 DGD .....	78
3.2.4	基于序贯分析的 DGD .....	79
3.2.5	二元量化目标回波脉冲串的软件化 DGD .....	84
3.3	参数未知时相参脉冲信号的 DGD .....	86
3.3.1	数字检测器综合的问题描述 .....	86
3.3.2	自适应 DGD .....	88
3.3.3	非参量化 DGD .....	91
3.3.4	自适应非参量化 DGD .....	94
3.4	目标回波信号参数的数字化测量 .....	96
3.4.1	目标距离的数字化测量 .....	97
3.4.2	雷达天线匀速扫描时的角坐标估计算法 .....	98
3.4.3	雷达天线离散扫描时的角坐标估计算法 .....	102
3.4.4	多普勒频率测量 .....	105
3.5	跨周期数字信号处理的复杂广义算法 .....	107
3.6	总结与讨论 .....	109

## 第4章 目标航迹的检测与跟踪算法 .....

4.1	主要阶段与信号再处理过程 .....	121
4.1.1	波门的形状与尺寸 .....	122
4.1.2	基于距波门中心偏差最小的目标点指示算法 .....	126
4.1.3	重叠波门内的目标点分布与关联 .....	128
4.2	监视雷达目标航迹检测 .....	131
4.2.1	目标航迹检测的主要过程 .....	131
4.2.2	“ $2/m+l/n$ ”算法性能分析: 虚假目标航迹检测 .....	132
4.2.3	“ $2/m+l/n$ ”算法性能分析: 真实目标航迹检测 .....	137
4.3	监视雷达目标航迹跟踪 .....	140
4.3.1	目标航迹自动跟踪算法 .....	140
4.3.2	目标航迹检测与跟踪的联合算法 .....	143

4.4	总结与讨论 .....	144
<b>第5章</b>	<b>基于雷达观测的目标航迹参数滤波与外推 .....</b>	<b>150</b>
5.1	初始条件 .....	151
5.2	滤波子系统的方法描述 .....	151
5.2.1	目标跟踪模型 .....	151
5.2.2	观测模型 .....	154
5.3	对未知随机参数滤波问题的统计求解 .....	156
5.4	观测样本量固定时的线性滤波与外推算法 .....	157
5.4.1	基于最大似然准则的目标航迹参数最佳估计算法:一般情况 .....	158
5.4.2	线性目标航迹的最佳参数估计算法 .....	159
5.4.3	二阶多项式目标航迹的最佳参数估计算法 .....	163
5.4.4	目标航迹参数的外推算法 .....	166
5.4.5	极坐标系中目标航迹参数估计的动态误差 .....	167
5.5	非机动目标航迹参数的递归滤波算法 .....	169
5.5.1	最佳滤波算法的流程图 .....	169
5.5.2	线性目标航迹参数的滤波 .....	172
5.5.3	线性递归滤波器的稳定方法 .....	175
5.6	机动目标航迹参数的自适应滤波算法 .....	177
5.6.1	机动目标航迹参数滤波算法的设计原则 .....	177
5.6.2	混合坐标系中自适应滤波的实现方法 .....	179
5.6.3	基于贝叶斯方法的机动目标航迹自适应滤波算法 .....	182
5.7	复杂雷达信号再处理算法的逻辑流程 .....	188
5.8	总结与讨论 .....	190
<b>第6章</b>	<b>动态模式下复杂雷达系统控制算法设计原理 .....</b>	<b>198</b>
6.1	雷达控制子系统的配置和流程 .....	199
6.2	复杂雷达子系统参数的直接控制 .....	204
6.2.1	初始条件 .....	204
6.2.2	新目标搜索模式下的扫描指向控制 .....	204
6.2.3	目标跟踪模式下的目标更新控制 .....	208
6.3	新目标搜索模式下的扫描控制 .....	210
6.3.1	搜索控制最优化问题的描述和准则 .....	210

6.3.2	单个目标检测中的最佳扫描控制 .....	211
6.3.3	未知数量目标检测时的最佳扫描控制 .....	212
6.3.4	空中目标检测与跟踪的扫描控制算法实例 .....	215
6.4	目标跟踪时的能量资源控制 .....	218
6.4.1	控制问题描述 .....	218
6.4.2	目标跟踪模式下控制算法实例 .....	220
6.4.3	精度校正时的能耗控制 .....	222
6.5	目标搜索与跟踪复合模式下的能量资源分配 .....	224
6.6	总结与讨论 .....	227
<b>第二部分 用于实现雷达信号处理与控制算法的计算机系统设计原理</b>		
<b>第7章</b>	<b>雷达系统复杂算法的计算方法设计原则 .....</b>	<b>233</b>
7.1	设计规划 .....	234
7.1.1	通用并行计算机 .....	235
7.1.2	硬件定制设计 .....	236
7.2	复杂算法分配 .....	237
7.2.1	逻辑流程图与矩阵算法流程图 .....	238
7.2.2	算法的图形化流程图 .....	240
7.2.3	利用网络模型进行复杂算法分析 .....	242
7.3	采用微处理器子系统实现复杂数字信号处理算法的运算量估计 .....	246
7.3.1	基本数字信号处理算法的运算量 .....	246
7.3.2	基于网络模型的复杂算法运算量计算 .....	247
7.3.3	雷达系统复杂数字信号再处理算法的运算量 .....	249
7.4	计算过程的并行化 .....	253
7.4.1	复杂数字信号处理算法的层次图 .....	253
7.4.2	线性递归滤波算法宏操作的并行化 .....	260
7.4.3	复杂数字信号处理算法目标集的并行原则 .....	262
7.5	总结与讨论 .....	265
<b>第8章</b>	<b>复杂雷达系统数字信号处理子系统的设计原则 .....</b>	<b>271</b>
8.1	数字信号处理子系统的结构与主要技术规范 .....	271
8.1.1	单机子系统 .....	271
8.1.2	多机子系统 .....	273

8.1.3	用于数字信号处理的多微处理器子系统	275
8.1.4	用于雷达数字信号处理的微处理器子系统	278
8.2	有效运行速度需求	280
8.2.1	作为排队系统的微处理器子系统	280
8.2.2	作为排队系统的单微处理器控制子系统功能分析	283
8.2.3	微处理器子系统的有效运行速度	287
8.3	RAM 的容量与结构需求	290
8.4	微处理器系统设计时的微处理器选择	292
8.5	数字信号处理和控制微处理器子系统的组成与结构	293
8.6	用于数字信号处理的高性能中央微处理器子系统	296
8.7	用于数字信号预处理的可编程微处理器	298
8.8	总结与讨论	299
<b>第 9 章</b>	<b>数字信号处理子系统设计实例</b>	<b>306</b>
9.1	概述	306
9.2	数字信号处理和控制子系统结构设计	307
9.2.1	初始条件	307
9.2.2	数字信号处理和控制子系统的主要工作	308
9.2.3	用于信号处理和控制的中央计算机系统结构	311
9.3	相参信号预处理子系统的结构	312
9.4	非相参目标回波信号预处理子系统的结构	316
9.4.1	非相参目标回波信号预处理问题	316
9.4.2	非相参目标回波信号预处理子系统的需求	318
9.5	数字信号再处理子系统的技术要求	319
9.6	数字信号处理子系统的结构	322
9.7	总结与讨论	324
<b>第 10 章</b>	<b>数字信号处理系统分析</b>	<b>327</b>
10.1	数字信号处理系统设计	327
10.1.1	数字信号处理系统结构	327
10.1.2	非跟踪式 MTI 的结构与工作过程	328
10.1.3	作为排队系统的 MTI	330
10.2	“ $n-1-1$ ” MTI 系统分析	335
10.2.1	所需存储通道的数量	335

10.2.2	检测-选择器的性能分析 .....	336
10.2.3	MTI 特性分析 .....	338
10.3	“ $n-n-1$ ” MTI 系统分析 .....	340
10.4	“ $n-m-1$ ” MTI 系统分析 .....	341
10.5	目标跟踪系统的比较分析 .....	343
10.6	总结与讨论 .....	345
<b>第三部分 雷达系统中随机过程的测量</b>		
<b>第 11 章</b>	<b>统计估计理论综述 .....</b>	<b>349</b>
11.1	概念与问题表述 .....	349
11.2	点估计及其性质 .....	352
11.3	有效估计 .....	353
11.4	代价函数和平均风险 .....	354
11.5	不同代价函数对应的贝叶斯估计 .....	358
11.5.1	简单代价函数 .....	358
11.5.2	线性代价函数 .....	360
11.5.3	二次代价函数 .....	360
11.5.4	矩形代价函数 .....	361
11.6	总结与讨论 .....	362
<b>第 12 章</b>	<b>数学期望的估计 .....</b>	<b>365</b>
12.1	条件函数 .....	365
12.2	数学期望的最大似然估计 .....	369
12.3	数学期望的贝叶斯估计:二次代价函数 .....	376
12.3.1	信噪比极低的情况( $\rho^2 \ll 1$ ) .....	378
12.3.2	信噪比极高的情况( $\rho^2 \gg 1$ ) .....	380
12.4	数学期望估计方法的应用 .....	381
12.5	基于随机过程采样值的数学期望估计 .....	391
12.6	对随机过程进行幅度量化后的数学期望估计 .....	401
12.7	高斯随机过程时变数学期望的最佳估计 .....	406
12.8	基于时间平均的随机过程时变数学期望估计 .....	413
12.9	利用迭代法估计数学期望 .....	418
12.10	具有未知周期的周期性数学期望的估计 .....	420
12.11	总结与讨论 .....	426

<b>第 13 章 随机过程方差的估计</b> .....	431
13.1 高斯随机过程方差的最佳估计 .....	431
13.2 基于时间平均的随机过程方差估计 .....	439
13.3 随机过程方差估计的误差 .....	444
13.4 随机过程时变方差的估计 .....	448
13.5 噪声中随机过程方差的测量 .....	454
13.5.1 方差测量的补偿法 .....	455
13.5.2 方差测量的比较法 .....	459
13.5.3 方差测量的相关法 .....	462
13.5.4 方差测量的调制法 .....	464
13.6 总结与讨论 .....	470
<b>第 14 章 随机过程概率分布函数与概率密度函数的估计</b> .....	473
14.1 基本估计准则 .....	473
14.2 概率分布函数估计的特性 .....	477
14.3 概率分布函数估计的方差 .....	480
14.3.1 高斯随机过程 .....	480
14.3.2 瑞利随机过程 .....	484
14.4 概率密度函数估计的特性 .....	489
14.5 基于级数展开式系数估计的概率密度函数估计 .....	494
14.6 概率分布函数与概率密度函数估计器的设计原则 .....	498
14.7 总结与讨论 .....	505
<b>第 15 章 随机过程的时频参数估计</b> .....	507
15.1 相关函数估计 .....	507
15.2 基于级数展开的相关函数估计 .....	515
15.3 高斯随机过程相关函数参数的最佳估计 .....	522
15.4 相关函数的其他估计方法 .....	535
15.5 平稳随机过程的功率谱密度估计 .....	541
15.6 随机过程尖峰信号参数估计 .....	549
15.6.1 尖峰信号的均值估计 .....	550
15.6.2 尖峰信号平均持续时间和尖峰信号之间平均间隔的估计 .....	555
15.7 功率谱密度的均方频率估计 .....	558
15.8 总结与讨论 .....	561

## 绪 论

本书主要讨论复杂雷达系统中的稳健信号处理问题及其特点,书中既阐述了数字信号处理过程中的综合与分析这一传统问题,也论述了噪声中的稳健信号处理这一新问题,特别是相参滤波情况下的噪声环境中信号处理的广义方法。随着自动化技术的进展,雷达系统也经历了不断的发展,复杂雷达系统功能的调整与控制,无论是其问题描述还是相应解决方法,都面临着新的挑战。

如果基于现代观点进行复杂雷达系统的设计,在设计阶段选取稳健信号处理算法时,非常重要的一点就是必须保证该算法能够满足复杂雷达系统全局算法的实现要求。从这个意义上说,本书重点关注系统设计的相关问题,书中采用了专门的系统学方法对稳健信号处理算法实现的复杂性和困难性进行了分析,从而提出了复杂雷达系统应予满足的需求。

作为一种信息与控制系统,复杂雷达系统的构建是一个漫长的多阶段过程,其中的一个重要阶段是设计阶段,必须大幅提高设计质量才有可能缩短雷达的研发周期。为解决这一问题,根据雷达系统的特点和工作条件,充分利用科学方法设计构建复杂雷达系统就显得极为重要。

信号参数估计问题是雷达设计的重要内容之一,信号参数的估计通常基于随机过程的理论分析方法和实验分析方法,在以下几种情况中会用到随机过程的实验分析方法:

- (1) 对通过线性系统或非线性系统后的信号变换情况进行分析时,缺乏输入随机过程的统计特性以及生成输入随机过程的物理源统计特性的先验信息。
- (2) 当复杂雷达系统分析所用理论方法的准确性还有待验证时。
- (3) 当复杂雷达系统中物理过程的数学描述烦琐且缺乏实用价值时。

基于统计估计理论,本书给出了复杂雷达系统的信号参数估计方法以及最佳和准最佳测量系统的设计方法,同时也对信号参数测量的系统误差和随机误差进行了重点分析,这两种误差通常都是观测时间和噪声水平的函数。相比于确定性过程来说,复杂雷达系统对于随机过程的实验分析方法要更加困难和复杂,其原因是:

- (1) 为了完整地描述随机过程,需要不同参数的大量实测数据。
- (2) 在实际工作中,难以根据某个参数的定义对其进行测量。

随机过程的主要统计特性包括均值、方差、相关函数、功率谱密度、概率密度函数和概率分布函数等,书中对其各种测量方法和估计方法进行了深入研究,既给出了稳健信号处理的参数测量方法和误差分析方法,也给出了数字式测量系统的实现框图。对均值、方差和相关函数等,给出了参数估计的最佳测量系统的结构,并分析了相应估计的偏差和方差,详细讨论了非平稳随机过程数学期望和方差的测量方法。对于服从高斯分布或瑞利分布的特殊随机过程,给出了其主要统计参数估计的偏差和方差的通用数学表达式,以便于后续的解析计算。

在复杂雷达系统中,基于噪声中信号处理的广义方法进行稳健信号处理时,对于随机过程的分析经常会遇到如下主要数理统计问题:

- (1) 对未知的概率分布函数和概率密度函数进行估计。
- (2) 对概率分布函数和概率密度函数的未知参数进行估计。
- (3) 统计假设检验。

需要说明的是,相比较而言,更经常遇到的是前两个问题。

大数定理是实验分析方法中用于确定随机过程特性的基础。根据大数定理,一个事件的概率可用相应事件的出现频率代替,数学期望可用平均值代替。在实际工作中,如果已经进行了大量的测试,则可认为用这种方式获得的事件概率与特性跟真值比较接近。但有些情况下所能进行的观测次数有限,如果仍采用基于大数定理的数学公式,则带来的问题就是跟观测设备的潜在精度相比,基于观测样本进行参数估计所能达到的估计精度会产生多大的差异。

基于统计决策理论的方法可以获得随机过程参数的精确估计结果,利用该理论可以设计和构建出噪声中确定性信号和准确确定性信号的最佳测量设备,并对信号参数进行分析和估计<sup>[1-5]</sup>。另外,文献<sup>[6-21]</sup>也广泛讨论了随机过程的实验分析方法,并给出了统计参数估计的精确方法。

根据统计估计理论,本书尝试采用统一的方法论对随机过程参数的测量方法进行分析,并对各态历经平稳随机过程及其参数测量的模拟式方法进行了研究(原因在于这种方法的精度往往比较高)。复杂雷达系统进行稳健信号处理时,如若采用数字式测量技术,则需要对信号进行模/数转换,并且应当使用计算机子系统<sup>[22]</sup>。

书中给出了概率分布函数和概率密度函数、相关函数和协方差函数、数学期望、方差、功率谱密度的潜在估计精度,该精度取决于观测时间、随机过程的相关时间、信噪比等。为了评估随机过程参数估计的精度,采用了统计估计理论和数理统计理论中广泛应用的偏差、方差和相关函数等。为了简便起见,书中有些地方采用了近似处理,这在实际工作中是可以接受的。

本书是作者过去 30 年研究工作的总结,主要内容分为三个部分:第一部分对复杂雷达系统中现代稳健信号处理算法的主要原理进行了讨论,重点论述了噪声中信号处理的广义方法;第二部分主要论述基于计算机系统实现现代稳健信号处理算法时,计算机系统的主要设计原则,并给出了一些复杂雷达系统的设计实例;第三部分主要论述了随机过程统计参数的实验测量方法以及参数估计方法,给出了实验分析方法下数学期望、方差、相关函数、概率密度函数、概率分布函数及时频参数等主要统计参数的估计方法。

本书共包括 15 章。第 1 章讨论了复杂雷达系统设计的系统方法学原理。重点论述了复杂雷达系统设计的系统方法学和主要技术要求,涵盖了复杂雷达系统的设计阶段所要解决的问题,同时还对作为设计对象的信号处理子系统进行了阐述。

第 2 章讨论了基于数字式广义检测器的信号处理方法。介绍了对信号进行模/数转换的主要原理,对噪声中信号处理的广义方法和匹配滤波方法进行了对比分析,并给出了主要结果。另外,针对相参脉冲信号处理要求,对数字式匹配滤波器和数字式广义检测器也进行了比较。

第 3 章提出了跨周期数字信号处理算法。研究了用于动目标指示的数字信号处理算法,分别对统计参数已知和未知两种情况下的目标回波数字式广义检测器进行了讨论,并对其性能进行了分析,讨论了信号参数的数字化测量方法以及跨周期数字信号处理的复杂广义算法。

第 4 章讨论了基于噪声中广义信号处理方法的稳健信号检测算法和目标航迹跟踪算法。提出了利用测量子系统所获得的数字式测量结果进行滤波的航迹跟踪算法,介绍了信号再处理的主要阶段,分析和讨论了利用监视雷达数据进行目标航迹检测和目标航迹跟踪的相关算法。

第 5 章给出了基于噪声中信号处理广义方法的参数滤波算法,以及利用复杂雷达系统获得的测量数据对目标航迹参数进行外推的算法。介绍了航迹参数估计和误差分析的初始条件,对广义接收机前端待滤波的输入随机过程进行了分析,讨论了通过滤波技术获得信号未知参数的统计求解方法、观测样本量固定时的线性滤波与外推算法、非机动目标航迹参数的递归滤波算法,分析了机动目标航迹参数的自适应滤波方法,并给出了信号再处理的逻辑框图。

第 6 章讨论了动态运行模式下的复杂雷达系统控制算法的设计和构建原理,介绍了复杂雷达系统控制子系统的配置和流程。阐述了对参数(尤其是子系统参数)进行直接控制的方法,提出了新目标搜索模式下的雷达扫描控制程序,给出了目标跟踪模式下的资源控制准则,描述了目标搜索和目标跟踪复合模式下的能量资源分配方法。